



TITLE:

# <大学の研究・動向>トーラス型磁場閉じ込めプラズマにおける非軸対称性

AUTHOR(S):

中村, 祐司; 石澤, 明宏

---

CITATION:

中村, 祐司 ...[et al]. <大学の研究・動向>トーラス型磁場閉じ込めプラズマにおける非軸対称性. Cue 2016, 35: 3-8

ISSUE DATE:

2016-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/210155>

RIGHT:

## 大学の研究・動向

# トーラス型磁場閉じ込めプラズマにおける非軸対称性

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野

教授 中 村 祐 司

准教授 石 澤 明 宏

## 1. はじめに

### 1.1 エネルギー問題と人工太陽（核融合炉）

周知のとおり、1970年代のオイル・ショック以来、エネルギー問題が注目されるようになりました。近年ではそれに人口問題と環境問題も加わり、エネルギーの将来をどうするかは人類にとって最重要課題の一つとなっています。日本では、電力源として太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用も着実に進んでいますが、福島原発事故以降、石炭や石油など所謂「化石燃料」と呼ばれる炭化物を燃やす火力発電の割合も増加しています。再生可能エネルギーの多くは出力変動が大きく、ドイツにおける実例で示されるように再生可能エネルギーの電源構成比が20～30%としても瞬間最大発電量としては70%を超え得るため、大規模蓄電技術などにより出力変動を吸収できなければ、これ以上増やすのは困難ではないかとの指摘もあります。日本は2100年には人口が半分程度になるので大丈夫だとの冗談半分の指摘もありますが、世界的には現在73億人の人口が2050年には90億人、2100年には100億人を超えるとの予測されており、電源構成のベストミックスは当然として、環境・経済性・資源も考慮して中長期的に基幹一次エネルギー源をどうするのが問題となります。そのため我々は将来のエネルギーに対する複数の選択肢を用意しておく必要があり、私たちはその選択肢候補の一つとして人工太陽（核融合炉）を考えています。

地球上の生命にとって不可欠な太陽は天然の核融合炉であり、巨大なプラズマの塊です。核分裂反応と異なり、核融合反応では正の荷電粒子である原子核同士が融合するため、地上で熱核融合炉を実現するには、1億度を超える超高温プラズマを、太陽と全く比較にならないほど狭い装置内で如何に効率よく閉じ込めるかが鍵となり、その実現は容易ではありません。しかし、プラズマが荷電粒子の集合体であることは、磁場による閉じ込めを可能にしました。

長らく「夢」のエネルギー源と考えられてきた人工太陽ですが、現在、人工太陽の科学技術的実証を目的とした人類初の核融合実験炉であるITER（イーター：国際熱核融合実験炉）がフランスのカダラッシュ（マルセイユに近いプロヴァンス地方にある町）に建設中であり、2022年頃最初のプラズマ実験が行われる計画です。「トカマク」と呼ばれるプラズマ磁場閉じ込め方式を採用したITERは欧州・日本・ロシア・米国・韓国・中国・インドが国際協力で進めているプロジェクトで、約1グラムの燃料プラズマを閉じ込め、500メガワットの核融合出力を得ることを目標にしており、将来の発電炉の技術的見通しを得ることを目的としています。

### 1.2 トーラス型磁場閉じ込めプラズマ

高温プラズマを磁場により閉じ込めるための基本的アイデアでは、荷電粒子がローレンツ力により磁力線に巻き付いてサイクロトロン運動する性質を用います。この性質により、磁力線がある閉空間内に

閉じ込められるような磁場配位を構築できればプラズマを閉じ込めることができます。磁場のわき出しはないため、このような閉空間は幾何学的にトーラス（ドーナツ型）でなければならず、磁場閉じ込めでは主にトーラス・プラズマを考えます。このサイクロトロン運動を利用したプラズマ閉じ込めの描像は分かりやすく、プラズマ閉じ込めは単純なように見えますが、不均一磁場中では、荷電粒子は磁力線から離れる「ドリフト」運動をするほか、荷電粒子同士はクーロン衝突しますのでその挙動は複雑です。さらに、プラズマ中の荷電粒子自身の運動も磁場を作るため、自己無撞着な平衡磁場配位とその安定性解析が必要となります。

有望なトーラス磁場閉じ込め方式として、主に外部コイルに流す電流だけで、ドーナツ状のプラズマ（トーラス・プラズマ）の閉じ込めに適した磁場配位をつくる「ヘリカル系方式」と、外部コイル系だけでなくトーラス・プラズマ中に大きな電流を流すことで、磁場配位をつくる「トカマク方式」とが、挙げられます。一般に、プラズマ中に大きな電流を流す（通常は電磁誘導を用いる）トカマク方式では、回転対称性のある軸対称な磁場配位でプラズマを閉じ込めることができますが、主に外部コイル系に流す電流だけで閉じ込めに適した磁場配位を作るヘリカル系方式では、プラズマ電流を駆動する必要が無く、定常運転に適しているなど多くの利点があるのですが、磁場配位を軸対称とすることができないので、その実験・理論解析には対称性を利用することができず、三次元解析が必要となります。このような非軸対称ヘリカル系プラズマの例として、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置で閉じ込められるプラズマの形状を図1に示します。また、近年は、実験解析および理論解析の精度が上がったため、トカマクにおいても離散的なトロイダルコイルや様々な制御用非軸対称コイルの影響が重要な研究課題となっています。そこで、私たちの研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラス・プラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。以下では、当研究室が取り組んでいるいくつかの研究内容について紹介させていただきます。

## 2. 三次元 MHD 平衡解析

前節で説明したように、サイクロトロン運動を利用したプラズマ閉じ込めの描像は分かりやすいですが、プラズマ中の荷電粒子の集団的振舞を説明するには不十分です。とくにプラズマ中の諸現象を解析するには、最初にプラズマ中の磁場構造を自己矛盾なく求める必要があります。そのためにはプラズマ流体の力学的平衡を解析する必要があります。プラズマ流体の最も基本的な性質は、磁気流体力学（magnetohydrodynamics:MHD）で記述されます。

超高温プラズマを真空容器内といった比較的狭い領域に閉じ込めるために、プラズマの圧力分布には

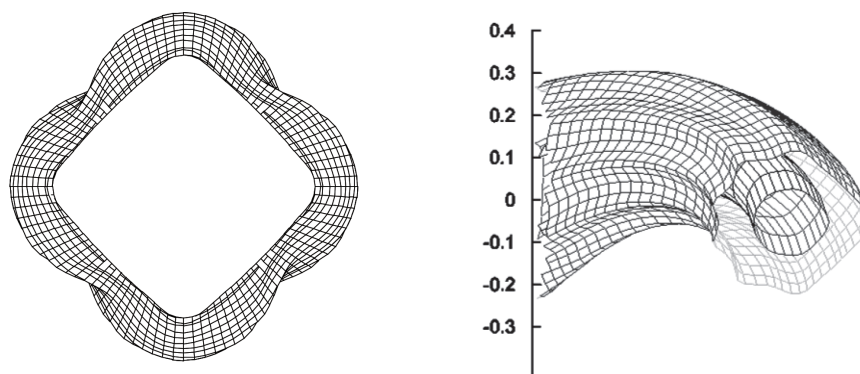


図1：ヘリオトロンJプラズマの上面図と断面図（磁気面）

急峻な勾配が存在し、プラズマはこの圧力勾配による力 ( $-\nabla p$ ) により外に拡がろうとします。これを電磁力 ( $\vec{j} \times \vec{B}$ ) で抑えようとするのがプラズマの磁場閉じ込め装置です。したがって、磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、これらの力がバランスした状態 ( $-\nabla p + \vec{j} \times \vec{B} = 0$ )、すなわち MHD 平衡を見つけることです。この MHD 平衡の式は、見た目は簡単で、たとえば一次元計算が可能な無限平板状プラズマに対しては容易に解析解を求めることができるのですが、二次元計算が必要なトカマク・プラズマのようなドーナツ状の軸対称トーラス・プラズマ (図 2) に対しては、その計算は容易でなくなり、特殊な解析解を除いて一般的にはコンピュータによる数値計算が必要となります (平衡計算は非線形問題となり、繰り返し計算が必要です)。このような平衡計算の例として、ITER の磁気面と周辺磁場ベクトルを図 3 に示します。図のセパトリックス構造を持つ緑線より外では磁力線は開いていますが、内側では閉じており、このセパトリックスがプラズマ閉じ込め領域の境界です。セパトリックス内の赤線は磁力線の織り成す面 (磁気面) の R-Z 平面での断面を表し、プラズマ圧力の等高線と一致します。ITER に代表されるトカマク配位では、外部コイルの作る磁場とプラズマ中を流れる電流が作る磁場の双方が組み合わさって図のような閉じ込め磁場構造を形成しています。

トーラス・プラズマの中でも軸対称性を持たないヘリカル系プラズマの平衡計算では、三次元計算が必要となるため、数値計算はさらに難しくなります。理論的にも対称性が欠如 (解析力学でいうサイクリック座標が欠如) した三次元配位では理想的な MHD 平衡は存在しない (近可積分系) と考えられており、その解析は質的にも量的にも困難を極めます。また、通常は軸対称性が成り立つと考えられるトカマクの平衡においても、トロイダル磁場コイル (TFC) の離散性に起因する磁場の弱い非軸対称性が存在するだけでなく、プラズマの安定性を目的としたコイルなど非軸対称な制御用コイルが用いられることがあり、非軸対称な 3 次元 MHD 平衡の解析の重要性が高まっています。そこで、私たちの研究室では、ヘリカル系プラズマやトカマク・プラズマなどのトーラス・プラズマを対象に、三次元 MHD 平衡解析に関する研究を進めています。とくに最近では、三次元 MHD 平衡計算コードの高精度化、新しい三次元 MHD 平衡計算アルゴリズムの開発、トカマク・プラズマのデイスラプションにともなう MHD 平衡の三次元ダイナミクス解析とその制御に関する研究を進めています。図 4 には様々な非軸対称コイルが作る磁場を考慮した ITER の三次元 MHD 平衡計算から得られた非軸対称性な磁場強度分布を示します。図に示したのは、TFC の離散性による磁場強度のリップルを低減するためのフェライト鋼 (FI) とフェライト製のテスト用ブランケット・モジュール (TBM) の影響を考慮した平衡計算の結果で、青で示した領域で磁場強度が弱くなっていることが分かります。このような磁場構造がプラズ

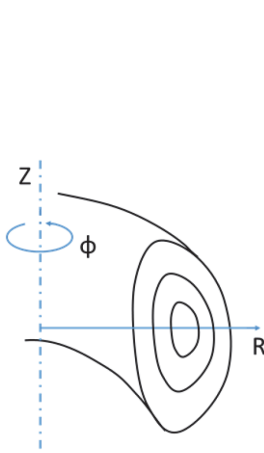


図 2 : トーラス配位

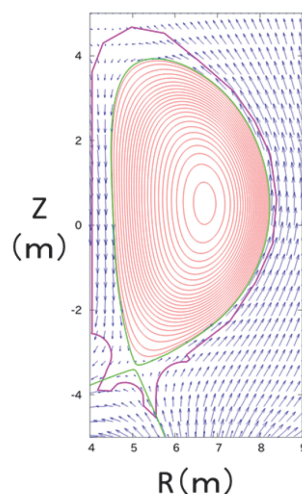


図 3 : ITER の MHD 平衡

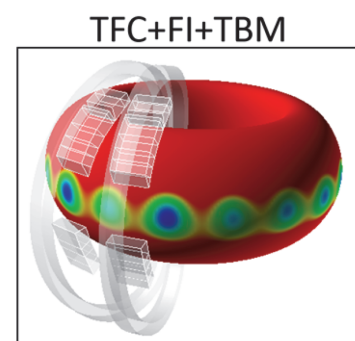


図 4 : ITER の三次元 MHD 平衡から得られた磁場の非軸対称性



マの加熱・閉じ込め性能に及ぼす影響を明らかにする上で、三次元 MHD 平衡計算はその基盤となる解析です。

### 3. ヘリカル系プラズマにおける新古典フローと粘性

磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能を決める重要な要素として、プラズマの輸送過程が挙げられます。超高温プラズマを真空容器内といった比較的狭い領域に閉じ込めるため、プラズマの温度・密度分布には急峻な勾配が存在します。これらの勾配は「熱力学的力」と呼ばれ、プラズマ粒子やエネルギーの外向きの流れをもたらします。たとえば、一様磁場中ではプラズマ中の荷電粒子はローレンツ力によって磁力線に巻き付きませんが、荷電粒子同士のクーロン衝突を考慮すれば磁力線を横切る粒子拡散が起こるため、磁力線に垂直方向に密度勾配があれば、密度の高い方から低い方へと粒子の流れが生じます。このような衝突性の粒子輸送は「古典輸送」と呼ばれます。さらにトーラス・プラズマのように磁場に非一様性があるとドリフトと呼ばれる粒子の磁力線を横切る運動が生じ、これが衝突性輸送を増大させます。これは「新古典輸送」と呼ばれています。実際のトーラス型磁場閉じ込めプラズマでは様々な微視的不安定性により渦ができ、この渦による対流が「乱流輸送」をもたらしており、特にプラズマの周辺に近い領域ではこの乱流輸送がプラズマの閉じ込め性能を支配していると考えられています。

近年、多くのプラズマ磁場閉じ込め装置において、「閉じ込め改善モード」と呼ばれる乱流輸送が抑制された状態が見つっています。この乱流抑制には大きな渦を引きちぎり、小さな渦に分裂させるようなプラズマの強い流れが重要な役割を果たすため、プラズマ中のフローとその大きさを決める粘性の研究が様々な装置においてなされています。ヘリオトロン J 装置でも、プラズマ中に不純物として存在する炭素イオンが荷電交換再結合時に放出する光を分光学的に測定することにより、炭素イオンのフローが計測されています。我々の研究室ではこのプラズマ中のフローを対象として、新古典輸送理論に基づいた理論解析を行っています。

前述の通りプラズマの径方向の輸送現象では、多くの場合乱流輸送が支配的ですが、新古典輸送の影響も無視できず、とくに磁力線方向の運動量保存に関係した物理量、たとえばブートストラップ電流と呼ばれる自発電流や磁力線方向のフロー・粘性は新古典輸送理論で説明できると考えられています。しかし、ヘリオトロン J プラズマのような非軸対称で複雑な形状を持つプラズマ中に、水素、重水素、不純物など複数のイオンが存在し、さらに中性粒子ビーム入射などによる外部からの運動量源も存在する場合、この新古典輸送理論に基づく解析も大変難しくなり、複雑な数値解析が必要となります。我々の研究室ではこの理論解析に成功し、実験で観測された炭素不純物のフローが、中性粒子ビーム入射による外部運動量源を考慮すれば、新古典輸送理論でおおよそ説明できることを初めて示すことができました。

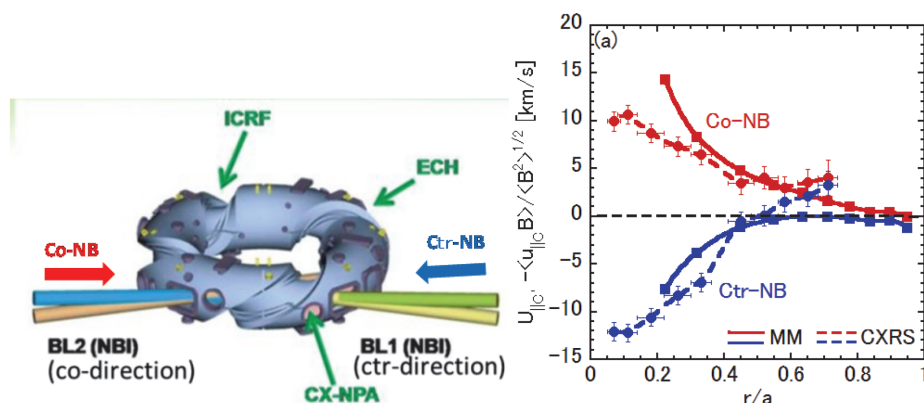


図5：ヘリオトロン J における NBI 加熱プラズマ中の炭素不純物のフロー

た（図5に実験で計測された磁力線方向のフロー（破線）と計算結果（実線）の比較を2ケース示します）。図の赤線はCo方向に中性粒子ビームを入射したとき、青線はCounter方向に入射したときの炭素不純物のフローを表しています。また、閉じ込め磁場配位を変えた場合の結果も解析しており、実験で得られたフローの配位依存性も新古典理論の予測と一致することが分かりました。今後、これらの成果を核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）の実験解析に適用するとともに、その物理メカニズムを明らかにしていく予定です。

#### 4. ヘリオトロンJにおける電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析

磁場閉じ込めプラズマの加熱法は色々ありますが、その中の一つに電子加熱を目的とした電子サイクロトロン波共鳴加熱（ECH）があります。これは電子レンジとよく似た原理を用い、電子サイクロトロン波（ECW）と呼ばれる電磁波をプラズマに入射し、共鳴により電子を加熱する方法です。しかしこの方法は、プラズマ密度がある程度高くなると、電磁波が反射されプラズマ中に入っていかなくなる欠点があります。これを克服する方法として、入射したECWをプラズマ中で電子バーンシュタイン波（EBW）と呼ばれる静電波にモード変換する方法が考えられています。EBWにモード変換することのできるECWは異常波（Xモード）と呼ばれ、これがプラズマ中に伝播するには強磁場側からECWを入射する必要があります。しかし多くの場合、工学的制約のためECWの入射は弱磁場側から行うことが望ましいため、弱磁場側からプラズマ中に入っていける正常波（Oモード）というECWを入射し、プラズマ中でXモードに変換し、さらにこれをEBWにモード変換する方法も考えられており、ヘリオトロンJ装置でもこの方法を用いた加熱実験が計画されています。OモードからXモード、XモードからEBWへのモード変換が起こるためには、それぞれいくつかの条件があるため、それらの条件をすべてクリアし、プラズマ中心領域をうまく加熱するには詳細な理論解析が必要となります。これらの解析には、先に述べた三次元MHD平衡の数値解を用いた数値解析が不可欠です。

ECWの波長はプラズマ中の物理量が空間的に変化する特性長より十分に短いため、多くの場合、幾何光学近似が成り立ち、レイトレーシング（光線追跡）法による数値解析が可能です。そこで、現在ヘリオトロンJにおける電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析を行っています。ヘリオトロンJ装置で閉じ込められるプラズマに対して求めた三次元MHD平衡を用いてレイトレーシング計算を行います。今回考えている加熱法では、OモードからXモードへのモード変換が重要で、うまくレイの入射角度を選ばないとモード変換は起こらず、単にOモードが反射されてレイはプラズマ内部に

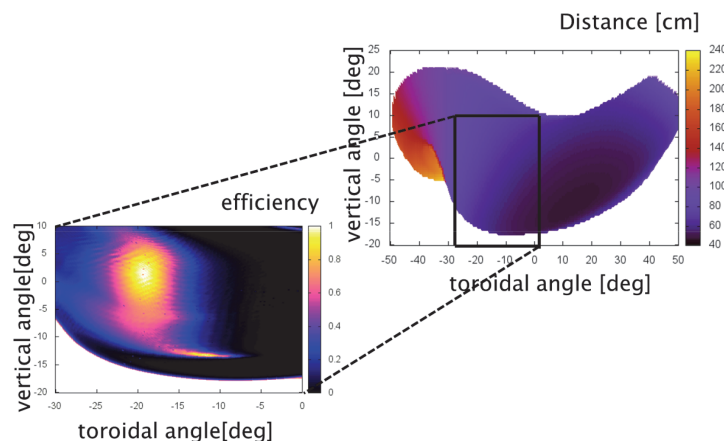


図6：ヘリオトロンJにおけるO-X変換効率分布

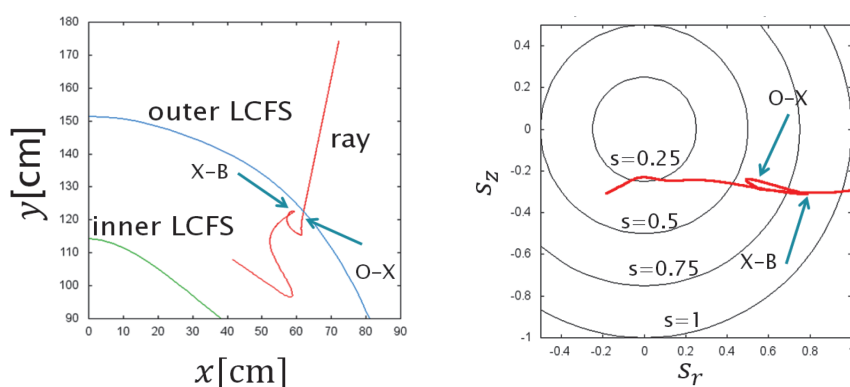


図7：ヘリオトロンJにおけるレイの軌跡  
(左：トップビュー、右：磁気座標におけるポロイダル断面)

入らないことになります。図6の右上図はレイの入射点から見たヘリオトロンJプラズマであり、左下図はOからXへの変換効率のカラーマップグラフです。カラーマップにおいて白い、狭い領域がXモードへの変換が可能な入射角を示しています。レイトレーシング計算の結果、この角度で入射すればXモードに変換されたECWが、プラズマ内部領域でさらに電子バーンシュタイン波に変換され、ヘリオトロンJにおいても電子バーンシュタイン波加熱が可能が示されました。図7に、そのようなレイの軌跡を示します。左図はレイのトップビューを表し、青と緑の曲線で囲まれた領域がプラズマ内部を表しています。右図は、レイの軌跡を磁気座標におけるポロイダル断面に投影した図です。これらの図より、Oモードで入射された電磁波はプラズマに入るとXモードに変換され、さらに電子バーンシュタイン波に変換されたのち、その波のエネルギーはプラズマの中心領域で吸収されることが示されています。これらのモード変換は逆過程も起こるため、プラズマ計測の手段としても有用であると考えられています。

## 5. おわりに

以上のように、当研究室が非軸対称トーラス・プラズマを対象に取り組んでいる研究内容の一部について紹介させていただきました。参考となる文献を下記に示します。

今後とも、皆様のご指導、ご鞭撻をお願いいたします。

## 参考文献

- [1] M. Bunno; Y. Nakamura; Y. Suzuki; K. Shinohara; G. Matsunaga; K. Tani, Plasma Science and Technology, **15**, 2 (2013) 115-118.
- [2] M. Bunno, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Shinohara, G. Matsunaga, K. Tani, Physics of Plasmas, **20**, 8 (2013) 082511.
- [3] M. Bunno; Y. Nakamura; Y. Suzuki; K. Shinohara; G. Matsunaga, Nuclear Fusion, **52**, 8 (2012) 83009.
- [4] Kenji NISHIOKA, Yuji NAKAMURA and Shin NISHIMURA, Plasma and Fusion Research, **9** (2014) 1403145.
- [5] S. Nishimura; H. Sugama; H. Maaßberg; C.D. Beidler; S. Murakami; Y. Nakamura; S. Hirooka, Physics of Plasmas, **17**, 8 (2010) 082510.
- [6] N. Fujita, Y. Nakamura, K. Nagasaki, プラズマ・核融合学会 第29回年会 (2012年11月27日～30日、クローバープラザ (福岡県春日市)) 予稿集 28pA04